
PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE E EMISSÕES DE CO₂: UM
CONTRIBUTO PARA A LITERATURA EMPÍRICA

Inês Sousa Lopes

Dissertação
Mestrado em Economia

Orientado por
Maria Isabel Rebelo Teixeira Soares

2018

Agradecimentos

Este último ano, foi um ano de enormes desafios profissionais e pessoais. A conclusão desta dissertação foi mais um desafio superado. Gostaria de agradecer à FEP, a faculdade que tão bem me acolheu nestes dois anos de mestrado, em especial à professora Isabel Soares por todo o apoio e amizade.

Nada disto seria possível sem a minha família, em especial a minha mãe que me proporcionou chegar até aqui. Dedico esta dissertação ao meu avô, que todos os dias se encontra presente na minha vida através da força e luta que me dá para conseguir superar todos os meus objetivos.

Um grande obrigado aos meus amigos por todo o amor, amizade e paciência. Sem eles este percurso teria sido muito mais complicado. Agradeço também aos meus colegas de trabalho por todo o apoio que me deram.

Por último, e com um enorme carinho, agradeço à Universidade da Beira Interior por ter sido uma escola de vida, de sabedoria e de felicidade ao longo da minha licenciatura.

Resumo

As alterações climáticas têm sido dos assuntos mais debatidos mundialmente. Os governos tentam encontrar soluções para mitigar as emissões e proporcionar um ambiente mais sustentável e seguro. Sendo o setor energético o principal poluidor e atendendo à eletrificação crescente das economias, substituir os combustíveis fósseis por fontes menos poluentes tem sido a solução mais adotada. Neste âmbito, as energias renováveis e a energia nuclear assumem um papel primordial.

Utilizando uma amostra de 10 países que constituem economias de referência em termos económicos e para um horizonte temporal de 1991 a 2014, pretende-se estudar o impacto que os diferentes *drivers* têm sobre emissões de CO₂ *per capita*. Esses *drivers* são as principais fontes utilizadas na produção de eletricidade, sendo eles os combustíveis fósseis, as energias renováveis e a energia nuclear. Como variável económica temos o PIB *per capita*. O objetivo é estudar as relações de equilíbrio a longo prazo entre as variáveis e a sua relação de causalidade no curto prazo e no longo prazo.

Para obter os resultados pretendidos, são utilizados dois modelos que permitem observar a relação de equilíbrio no longo prazo entre as variáveis em estudo: *fully modified ordinary least squares* e o *dynamics ordinary least squares*. É também estudada a causalidade entre as variáveis a partir do teste de causalidade de Granger.

Os resultados obtidos permitem-nos concluir que os combustíveis fósseis provocam um aumento das emissões, em oposição às energias renováveis que contribuem para a sua redução. Foi também possível verificar que, em termos globais, a energia nuclear não tem impacto significativo na redução das emissões.

Palavras-Chave: Emissões de CO₂, Produção de Eletricidade, Crescimento Económico, Dados em Painel

Códigos-JEL: C13, C23, Q42

Abstract

Climate change has been one of the most debated issues in the world. Governments are seeking solutions to mitigate emissions and provide a more sustainable and secure environment. Since the energy sector is the main polluter and, given the increasing electrification of the economies, replacing fossil fuels with less polluting sources has been the most adopted solution. In this context, renewable energy and nuclear energy play a key role.

Using a sample of 10 countries that constitute economies of reference in economic terms and for a time horizon from 1991 to 2014, we intend to study the impact that different drivers have on CO₂ emissions per capita. These drivers are the main sources used in the production of electricity: fossil fuels, renewable energy and nuclear energy. As an economic variable we have GDP per capita. The objective is to study long-term equilibrium relationships between variables and their causation relationship in the short term and in the long term.

To obtain the desired results, two models are used to observe the equilibrium relation in the long term between the variables under study: fully modified ordinary least squares and dynamics ordinary least squares. The causality between the variables is also studied from the Granger causality test.

The results obtained allow us to conclude that fossil fuels contribute to the increase of CO₂ emissions. On the other hand, renewables energies lead to a reduction of these type of emissions. It is also possible to conclude that, overall, nuclear energy has no significant impact on reducing emissions.

Keywords: CO₂ Emissions; Electricity Production; Economic Growth; Panel Data

JEL-Codes: C13; C23; Q42

Índice de Conteúdos

| | |
|---|-----|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | ii |
| Abstract..... | iii |
| Índice de Conteúdos | iv |
| Índice de Tabelas | v |
| Capítulo 1. Introdução..... | 1 |
| Capítulo 2. Revisão de Literatura | 6 |
| 2.1. A relação entre o setor elétrico e as emissões de CO ₂ | 6 |
| 2.2. Políticas nacionais de mitigação | 7 |
| 2.3. Produção de eletricidade e emissão de CO ₂ : abordagens metodológicas | 9 |
| Capítulo 3. Metodologia | 11 |
| Capítulo 4. Desenvolvimento do modelo | 17 |
| Capítulo 5. Conclusão | 24 |
| 5.1. Trabalhos futuros | 27 |
| Referências..... | 28 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Descrição das variáveis em estudo..... | 11 |
| Tabela 2- Estatísticas descritivas..... | 17 |
| Tabela 3- Matriz das correlações (variáveis em logaritmos) | 18 |
| Tabela 4- Matriz das correlações (variáveis em primeiras diferenças) | 18 |
| Tabela 5- Teste VIF..... | 18 |
| Tabela 6- Teste de raiz unitária..... | 20 |
| Tabela 7- Teste de cointegração | 21 |
| Tabela 8- Testes FMOLS e DOLS | 21 |
| Tabela 9- Causalidade de Granger..... | 23 |

Capítulo 1. Introdução

O setor elétrico depende maioritariamente de combustíveis fósseis, sendo o carvão o combustível mais utilizado na medida em que, da produção térmica, é aquele que permite um custo marginal mais baixo. O setor energético, e em particular o setor elétrico, é também o responsável por grande parte das emissões de efeito de estufa e, consequentemente, é um vetor essencial das alterações climáticas (Ang e Su, 2016). Nessa medida, há uma crescente necessidade de reforçar as principais estratégias de mitigação de modo a reduzir substancialmente estas emissões e, consequentemente, a poupar mais energia (Solomon e Krishna, 2011).

Por outro lado e em termos globais, constata-se uma crescente eletrificação das economias o que reforça a necessidade de se intervir sectorialmente com vista ao reforço de combate ao aumento das externalidades ambientais. É neste âmbito que se inserem as políticas de apoio às energias renováveis. Estas energias permitem que o planeta seja mais limpo, mais sustentável e energeticamente mais seguro (Kumar *et al.*, 2010).

Assim, a diversidade de políticas nacionais de mitigação dos efeitos das alterações climáticas tem como vetor comum a alteração do *mix* de produção de energia elétrica. De acordo com diversos autores, nomeadamente Gismondi (2018), é devido à crescente utilização de combustíveis fósseis que a biodiversidade tem vindo a diminuir e, muito possivelmente, a verificarem-se situações de clima extremo e um aumento de catástrofes naturais. É então necessário que as lideranças políticas se comprometam com soluções que permitam diminuir as emissões de gases de efeito de estufa e fazer face aos elevados custos que essas possíveis soluções acarretam. Grande parte dessas soluções passam por substituir o sistema de energia dependente de combustíveis fósseis por um sistema dependente de energias sem/com baixo teor de emissões carbónicas (Mathiesen *et al.*, 2011).

Esta transição que envolve uma mudança radical de paradigma, traduz-se em diferentes perfis de custos de produção, acarreta diferentes níveis de dependência energética e tem subjacentes diversos perfis de investigação e desenvolvimento (I&D) e de crescimento económico.

Esta mudança também passa por adotar novas tecnologias que permitirão reduzir as emissões. Além das energias renováveis (Ito, 2017), a energia nuclear é uma das alternativas

e vários países apostaram – e alguns continuam a apostar - neste tipo de energia para reduzir as suas emissões (em particular de CO₂) a longo prazo (Syri *et al.*, 2013). Qualquer uma destas alternativas, implica um elevado investimento em tecnologias inovadoras.

Este estudo vai ser realizado para uma amostra de 10 países (Bélgica, China, França, Alemanha, Índia, Japão, Holanda, Espanha, Suécia e Estados Unidos), o que constitui uma contribuição para o conhecimento na área, embora modesto, tal como a revisão da literatura irá confirmar. A grande maioria são países Europeus, além do Japão, visto serem estes os principais impulsionadores de grandes medidas de redução das emissões de CO₂ e, neste momento, são também os que têm metas mais elevadas de redução das mesmas, exigindo assim uma elevada eletrificação (Egging e Tomasgard, 2018). Porém, incluem-se três *outliers* que, entretanto, têm vindo a convergir, - embora mais recentemente e a ritmos diversos assim como com diferentes estruturas socioeconómicas – com os objetivos de descarbonização.

Um dos países Europeus que lidera o setor das energias renováveis é a Alemanha. Desde a década de 90 que a Alemanha começou a criar soluções e a implementar políticas para aumentar o consumo de energias renováveis com o objetivo de abandonar a energia nuclear, tornando-se assim um líder nesse setor (Cherp *et al.*, 2017). Segundo estes autores, a energia eólica e a energia solar são as energias renováveis com maior percentagem de consumo na Alemanha e são aquelas que contribuíram para a diminuição do consumo de energia nuclear e emissões carbónicas. Embora as tarifas *feed-in* tenham ajudado no aumento do consumo de energia eólica, a Alemanha precisa de um nível mais elevado de inovação e, para isso precisa de novas tecnologias para ajudar na transição energética (Nordensvärd e Urban, 2015).

A Espanha tem implementado diversas medidas como créditos ao investimento ou tarifas *feed-in* para aumentar o consumo de energias renováveis (Bean *et al.*, 2017). Devido à implementação de medidas como as tarifas *feed-in*, a Espanha conseguiu aumentar a variedade do seu *mix* energético, dependendo não apenas de combustíveis fósseis, mas também de energias renováveis, especialmente a energia hidroelétrica (Ortega *et al.*, 2013).

Depois da crise no petróleo, a Holanda começou a produzir essencialmente energia eólica e energia solar pois o seu governo criou medidas como subsídios ao investimento, subsídios ao consumo, entre outras, que permitiram aumentar a produção de energias provenientes de fontes não fósseis (van Rooijen e van Wees, 2006). De acordo com estes

autores, a instabilidade associada à política holandesa, provoca uma diminuição de investimentos na área das energias e, por isso, o consumo de energias renováveis ainda continua a ser limitado. Há assim, uma crescente necessidade de o governo implementar medidas de apoio às energias renováveis.

Na década de 70 e depois dos choques no setor do petróleo, a França, teve necessidade de reestruturar a política energética através de medidas que permitissem a diminuição das emissões de CO₂, nomeadamente através da taxa sobre o carbono (Ang, 2007). A França produz grande parte da sua energia nas centrais nucleares. Esta energia pode contribuir para o crescimento económico do país devido ao elevado nível tecnológico ou pode retardar esse crescimento económico devido às políticas ambientais aplicadas a esta fonte de energia (Mbarek *et al.*, 2015). Estes autores sugerem que a França encontre um equilíbrio entre um ambiente seguro e um crescimento económico e, para isso se verificar é necessário um conjunto de medidas políticas apropriadas que o governo tem de implementar.

A Suécia ficou maioritariamente dependente de energia nuclear após a crise do petróleo e, posteriormente implementou uma série de medidas que visavam a substituição da energia nuclear por energias renováveis, sendo o sistema de fiscalidade o mais bem-sucedido (Wang, 2006). No entanto, segundo este autor, o país observou uma série de obstáculos à implementação de fontes renováveis como é o caso do investimento na energia eólica.

No passado, a Bélgica estava muito dependente de combustíveis fósseis aquando da produção de eletricidade, especialmente do petróleo e do carvão, até introduzirem a energia nuclear no país (Tõnurist *et al.*, 2015).

Quanto à Índia, esta deparou-se com uma escassez de combustíveis fósseis, o que teve impacto na maior utilização de fontes renováveis para a produção de eletricidade (Kumar *et al.*, 2010). De acordo com estes autores, para aumentar ainda mais o consumo destas energias e assim diminuir as emissões de carbono, a Índia tem de seguir importantes mecanismos (especialmente implementar tarifas) que lhe permitam ter o objetivo de liderar a produção de energia renovável dada a sua vantagem de possuir uma grande variedade de fontes renováveis como biomassa, solar, eólica, geotérmica e hídrica.

A China é considerada o maior consumidor de energia e o país que emite mais carbono e, de forma a reduzir as emissões e o consumo de energia proveniente de fontes

fósseis, Dong *et al.* (2018) sugerem que a China deve implementar políticas de redução das emissões, controlar o consumo de combustíveis fósseis e adotar o consumo baseado em fontes renováveis e nuclear. Embora a China ainda dependa maioritariamente de fontes fósseis para a produção de eletricidade, tem feito um esforço crescente para aumentar as energias renováveis no país e, devido às constantes políticas implementadas, a China lidera atualmente o setor das energias renováveis (Musa *et al.*, 2018).

Em março de 2011, ocorreu o colapso da central nuclear de Fukushima, o que fez com que o setor energético do país entrasse em crise (Huenteler *et al.*, 2012). De acordo com estes autores, antes deste incidente o objetivo energético do Japão era conseguir produzir eletricidade com uma elevada participação da energia nuclear. Posteriormente, o governo Japonês reviu todo o objetivo energético e começou a apostar nas energias renováveis, implementando medidas como tarifas *feed-in* ou subsídios ao investimento (Ayoub e Yuji, 2012).

Segundo Klass (2003), o *mix* energéticos nos EUA ainda é constituído maioritariamente por combustíveis fósseis, sendo o carvão um dos combustíveis principais na geração de eletricidade, estando ainda muito reduzida a utilização de fontes renováveis. De acordo com este autor, é esperado que no final do século esta situação se reverta e os Estados Unidos sejam sobretudo dependentes de energias renováveis, em especial biomassa e solar. Segundo Klein (2016), os EUA conseguem reduzir as emissões, especialmente no setor elétrico, através de uma mudança energética que passa por substituir o carvão por gás natural e energias renováveis.

O horizonte temporal escolhido foi de 1991 a 2014. Esta escolha prende-se com os dados encontrados para cada variável e país e devido ao facto de ser um período onde novas tecnologias e energias foram utilizadas, o que irá permitir chegar a conclusões que, potencialmente, poderão dar algum contributo à literatura nesta área. A variável dependente a utilizar será o valor *per capita* de emissões de CO₂, sendo as variáveis independentes a produção de eletricidade a partir de fontes fósseis (% total), a produção de eletricidade a partir da energia nuclear (% total), a produção de eletricidade a partir de energia hidroelétrica (% total), a produção de eletricidade a partir de energias renováveis com exceção da energia hidroelétrica (% total) e o PIB *per capita*.

Muitos artigos têm por base estudos de séries temporais e o consumo das energias, neste caso será realizada uma análise recorrendo a dois modelos econométricos que partam do modelo simples OLS (*Ordinary Least Squares*) mas que permitam corrigir os enviesamentos obtidos por este: o *Fully Modified Ordinary Least Squares* (FMOLS) (Phillips e Hansen, 1990; McCoskey e Kao, 1998; Pedroni, 2001) e o *Dynamic Ordinary Least Squares* (DOLS) (Saikkonen, 1991; Stock e Watson 1993; Pedroni, 2001). Estes modelos permitem estudar as relações de equilíbrio a longo prazo entre as variáveis. Iremos também estudar as relações de causalidade entre as variáveis explicativas e as emissões de CO₂, a partir da causalidade de Granger proposta por Engle e Granger (1987) num curto e longo prazo.

Este estudo incide, portanto, nonexo entre o setor elétrico e as emissões de CO₂ sob duas vertentes: a relação de causalidade a curto e longo prazo, bem como a relação de equilíbrio entre variáveis no longo prazo. Daí que, as nossas questões de investigação se possam sintetizar da seguinte forma:

- i. No conjunto dos países da amostra, como se comportam as variáveis seleccionadas até atingirem o equilíbrio a longo prazo?
- ii. É possível verificar uma relação de causalidade entre as emissões de CO₂ e as variáveis consideradas como *drivers*?
- iii. Qual a estratégia de mix de geração que se revelou mais eficaz na redução das emissões *per capita* de CO₂?

Este estudo está organizado da seguinte forma: depois desta Introdução (capítulo 1), o capítulo 2 apresentará uma revisão da literatura organizada por subtemas relevantes para esta dissertação. No capítulo 3 é seleccionada e descrita a metodologia e no capítulo 4 o modelo é desenvolvido para a nossa amostra e os resultados são analisados criticamente. Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões de acordo com as questões de investigação inicialmente propostas e identificam-se novos desafios de pesquisa.

Capítulo 2. Revisão de Literatura

2.1. A relação entre o setor elétrico e as emissões de CO₂

A energia contribui significativamente para o progresso económico de um país, no entanto pode provocar graves problemas ambientais (Zongxin e Zhihong, 1997). O setor energético é dos setores que mais contribui para o aumento das emissões. De forma a criar melhorias nesse setor e permitir um sistema de produção e consumo de energia mais renovável, é necessário que surjam novas e sofisticadas tecnologias com vista a aumentar a sustentabilidade (Sagar e Van der Zwaan, 2006).

Embora o setor elétrico seja um dos setores que permite o desenvolvimento da economia é também um dos principais consumidores de energia e emissor de carbono (Gu *et al.*, 2015). Este setor depende maioritariamente dos combustíveis fósseis sendo responsável por grande parte das emissões de efeito de estufa (GEE) e, consequentemente, das alterações climáticas (Ang e Su, 2016). O carvão continua a ser o combustível mais utilizado na geração de eletricidade, seguido do petróleo e do gás natural (BP, 2018)

Globalmente, para alcançar o objetivo de uma economia de baixo carbono, há a necessidade de descarbonizar -idealmente por completo -o setor elétrico. Entretanto, uma alteração no *mix* energético e a aposta em novas tecnologias constituem uma estratégia praticamente consensual (Chen *et al.*, 2011). Em suma, é necessária a ocorrência de uma transição energética que se refere a uma alteração substancial na estrutura do sistema de energia (Guidolin e Guseo, 2016).

2.2. Políticas nacionais de mitigação

Com a necessidade de uma transição energética, de forma a cumprir os objetivos de redução das emissões, vários países adotaram estratégias de mitigação. Para o setor elétrico, vários estudos foram realizados ao longo dos anos, especialmente referentes à sua descarbonização. As lideranças mundiais têm grande preocupação em arranjar soluções para diminuir as emissões de gases de efeito de estufa, promover um ambiente mais sustentável e seguro e, ao mesmo tempo, permitir o crescimento económico mundial (Mathiesen *et al.*, 2011). Parte dessas soluções passam, como vimos, por substituir o sistema de energia dependente de combustíveis fósseis por um sistema de energias renováveis.

Os países Europeus são os principais países que apostam em energias renováveis e que têm feito esforços para combater o excesso de emissões (Marques e Fuinhas, 2011). No entanto, a Europa necessita de políticas adicionais que permitam aumentar o investimento, aumentar infraestruturas energéticas, reduzir barreiras administrativas e financeiras e aumentar a produção/consumo de energias não fósseis (Klessmann *et al.*, 2011). Devido à implementação de certas políticas energéticas, espera-se que em 2040, o volume das emissões fique 35% abaixo do valor verificado em 2016 (BP, 2018).

A transição para uma economia europeia mais sustentável, implica a descarbonização do setor elétrico, visto ser este o setor que mais contribui para as elevadas emissões (Jägemann *et al.*, 2013). Segundo Scarlat *et al.* (2015), a Europa está a apostar na bioenergia, proveniente da biomassa e que será, a longo prazo, a energia que irá contribuir para a Europa cumprir as suas metas de mitigação das emissões, embora seja necessário que os governos europeus apostem em tecnologias mais avançadas. Obviamente, tal tese não é partilhada em termos tão exclusivos por outros autores.

Mathiesen *et al.* (2011), após estudarem a possibilidade de um sistema 100% renovável na Dinamarca, concluíram ser possível aumentar o crescimento económico do país e implementar fortes estratégias de mitigação das emissões de CO₂ através de investimentos em novas tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Essas tecnologias, como as utilizadas nas energias renováveis e energia nuclear nem sempre criam consenso na literatura.

Para Baek (2015), após estudar 12 países com elevada dependência da energia nuclear, concluiu que esta tem um importante papel na redução das emissões.

Menyah e Wolde-Rufael (2010), estudaram as emissões carbónicas nos EUA e também concluíram que a energia nuclear contribui para a redução das emissões e ainda demonstraram que as energias renováveis não têm impacto. Semelhantes resultados foram obtidos por Apergis *et al.* (2010) que estudou 19 países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Em oposição às conclusões destes autores, Jaforullah e King (2015) adaptaram o estudo realizado por Menyah e Wolde-Rufael (2010), introduzindo a variável preço da energia e concluíram que a aposta nas energias renováveis permite uma maior redução das emissões do que a energia nuclear. Vários autores como Saidi e Mbarek (2016) e Ito (2017) verificaram que as energias renováveis são de facto significativas para a redução das emissões.

Embora as energias renováveis e nuclear possam ser uma solução, a sua aplicação nas economias nem sempre é fácil e imediata. Por exemplo, no caso da Alemanha que é um país abundante em recursos fósseis (carvão), ao tentar expandir rapidamente as energias renováveis a partir dos seus recursos internos, em especial a energia eólica, utilizou carvão como intermediário nessa expansão (Cherp *et al.*, 2017).

Tsai *et al.* (2016) também demonstraram essa situação para os EUA, onde verificaram que na produção de eletricidade a partir de fontes renováveis e nuclear, utilizam os combustíveis fósseis como intermediários no processo. A conclusão retirada por estes autores é que a descarbonização é difícil sobretudo para países com elevados recursos fósseis.

Os recursos fósseis permitem um crescimento económico mais elevado do que as energias renováveis (Akella *et al.*, 2009). Moutinho e Robaina (2016) vieram demonstrar que os países ricos quando apostam em energias renováveis, não retardam o seu crescimento num curto prazo. Ou seja, estes países têm a capacidade de continuar a crescer sem comprometer o meio ambiente.

O crescimento económico, representado pelo PIB na literatura comum, apresenta-se como sendo um fator de elevado contributo para o aumento das emissões de CO₂. Bilgili *et al.* (2016) relacionou positivamente o PIB às emissões, demonstrando assim que um aumento do PIB provoca um aumento das emissões. Também Saboori *et al.* (2012) concluíram que tanto no curto prazo como no longo prazo, o PIB relaciona-se positivamente com as emissões de CO₂, contribuindo assim para o seu aumento.

2.3. Produção de eletricidade e emissão de CO₂: abordagens metodológicas

O nosso estudo teve como base metodológica alguns dos artigos mais citados. Um destes foi desenvolvido por Farhani (2013). Este autor estudou a relação entre o consumo de energia renovável, o crescimento económico e as emissões de CO₂ para um grupo de 12 países entre 1975 e 2008. Estudou a cointegração e a causalidade entre estas variáveis e para isso, utilizou como metodologia os modelos FMOLS e DOLS que permitiram analisar a relação de longo prazo entre as variáveis e a causalidade de Granger que permitiu verificar a existência ou não de uma causalidade no curto prazo e no longo prazo entre as variáveis consideradas.

Lu (2017), para uma amostra de 16 países Asiáticos, estudou a relação causal entre as emissões de gases de efeito de estufa, o consumo de energia e o crescimento económico. Através dos modelos FMOLS e DOLS estudou também a relação de equilíbrio a longo prazo entre as variáveis mencionadas. O horizonte temporal em que incidiu a investigação foi de 1990 a 2012.

Menyah e Wolde-Rufael (2010) estudaram a relação entre as emissões de CO₂, as energias renováveis, a energia nuclear e o PIB real para os EUA entre 1960 e 2007. Apoiaram-se essencialmente na causalidade de Granger para investigar a relação de causalidade entre as variáveis e utilizaram o modelo *vector autoregressive* (VAR).

Apergis *et al.* (2010) estudaram a relação causal entre as emissões de CO₂, o consumo da energia nuclear, o consumo de energias renováveis e o crescimento económico para um conjunto de 19 países desenvolvidos e em desenvolvimento entre 1984 e 2007. Para estudar esta relação utilizaram o *vector error correction model* (VECM), possibilitando assim estudar estas relações no curto prazo e no longo prazo.

Jaforullah e King (2015) realizou um estudo para os EUA para o período de 1965 a 2012, para observar quais os determinantes que tinham impacto significativo nas emissões de CO₂. O estudo é semelhante ao realizado por Menyah e Wolde-Rufael (2010) mas utilizando como metodologia o *vector error correction model* (VECM) e introduzindo o preço da energia como variável explicativa. Os resultados obtidos foram diferentes dos obtidos pelos outros autores.

Sadorsky (2009) realizou o seu estudo para os países G7 entre 1980 e 2005 e utilizou os modelos FMOLS e DOLS para estudar a relação de equilíbrio de longo prazo entre as energias renováveis, o PIB e as emissões de CO₂.

A partir dos artigos referidos, esta dissertação tenta dar algum contributo a um tema de grande importância.

Em primeiro lugar, a amostra de 10 países distintos entre si. Grande parte da amostra é constituída por países europeus, mas existe ainda o exemplo da China, Índia, Japão e EUA. Nesta amostra é visível a diferença económica entre os países, tal como o seu nível de desenvolvimento. Não obstante a questão da heterogeneidade, a amostra é constituída apenas por países com centrais nucleares.

O período temporal que vai de 1991 a 2014 abrange um grande período onde as novas energias (renováveis) tiveram um grande *boom*, permitindo ter resultados diferentes de alguma literatura acerca da importância das energias renováveis.

Outro possível contributo é a inclusão da variável relativa aos combustíveis fósseis. Grande parte dos estudos utilizam as energias renováveis, o PIB e a energia nuclear para estudar o impacto destas variáveis nas emissões de CO₂. Embora se conheça o impacto dos combustíveis fósseis nas emissões, é sempre importante estudar os mesmos e comparar com as demais formas de produção de eletricidade já que, quer os combustíveis quer as tecnologias, diferem entre si.

Outro contributo será também o das variáveis escolhidas, ou seja, a grande parte da literatura utiliza o consumo de energias como variáveis explicativas e neste estudo, será utilizada a produção de energia a partir de fontes fósseis, renováveis e nuclear (% total) que juntamente com o PIB *per capita* irão ajudar a explicar as emissões de CO₂ (variável dependente). A metodologia utilizada é comum na literatura para estudar relações de equilíbrio a longo prazo.

Capítulo 3. Metodologia

O grande objetivo desta dissertação é analisar quais os *drivers* que permitem uma maior descarbonização do setor elétrico e estudar a relação de equilíbrio a longo prazo entre as variáveis, assim como a relação causal entre estas num curto e longo prazo. Este estudo analisa individualmente cada *driver* e o impacto que estes têm nas emissões de CO₂.

A amostra é constituída por 10 países: Espanha, França, Alemanha, Holanda, Bélgica, Suécia, China, Japão, Índia e EUA. A escolha destes países prende-se com o facto de constituírem as principais economias a adotarem estratégias de mitigação mais eficazes e são os países que mais combatem as alterações climáticas.

O período temporal em estudo é de 1991 a 2014, pois os dados encontrados para cada variável e país apenas possibilitaram a análise neste período. O painel utilizado é um painel balanceado com $N \times T = 240$ observações ($N=10$ e $T=24$). O *software* utilizado será o *evIEWS 10* ($\times 64$).

Tabela 1- Descrição das variáveis em estudo

| Variáveis | Descrição | Fonte |
|-------------------------------|---|-------------------|
| <i>LCO₂</i> | Emissões de CO ₂ (<i>metric tons per capita</i>) | <i>World Bank</i> |
| <i>LFOSSIL</i> | Produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis (% total) | <i>World Bank</i> |
| <i>LGDP</i> | PIB <i>per capita</i> (<i>current US\$</i>) | <i>World Bank</i> |
| <i>LHYDRO</i> | Produção de eletricidade a partir de energia hidroelétrica (% total) | <i>World Bank</i> |
| <i>LNUC</i> | Produção de eletricidade através de energia nuclear (% total) | <i>World Bank</i> |
| <i>LREN</i> | Produção de eletricidade a partir de fontes renováveis, excluindo a energia hidroelétrica (% total) | <i>World Bank</i> |

Ang (2007), Ozcan (2013) e Ito (2017) utilizaram como variável dependente as emissões de CO₂ *per capita*, tal como sucede neste estudo.

Como variáveis explicativas (ou independentes) iremos utilizar a produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo e o gás natural (% total), a produção de eletricidade a partir de energia hidroelétrica (% total), a produção de eletricidade a partir de energia nuclear (% total), a produção de eletricidade a partir de energias renováveis com exceção da energia hidroelétrica (% total) e o PIB *per capita*. A não inclusão da energia hidroelétrica nas restantes energias foi sobretudo devido aos dados encontrados para as energias renováveis. Desta forma é possível estudarmos individualmente o impacto da energia hidroelétrica nas emissões de CO₂, já que esta é uma grande energia que está em constante desenvolvimento e crescimento.

Lotfalipour *et al.* (2010) e Ito (2017) utilizaram os combustíveis fósseis como uma das variáveis explicativas para o aumento das emissões de CO₂. Quanto às energias renováveis, podemos encontrar vários estudos onde estas variáveis são vistas como fontes de energia que irão permitir uma diminuição nas emissões (*e.g.*, Bilgili *et al.*, 2016; Saidi e Mbarek, 2016), assim como a energia nuclear (*e.g.*, Apergis *et al.*, 2010; Menyah e Wolde-Rufael, 2010). Como variável económica temos o PIB *per capita* utilizada como *proxy* do crescimento económico na literatura, sendo uma das variáveis mais importantes para estudar o impacto nas emissões de CO₂ (*e.g.*, Sadorsky, 2009; Baek, 2015; Bilgili *et al.*, 2016).

Como referido, um dos objetivos deste estudo é estudar a relação de equilíbrio de longo prazo entre as variáveis:

$$LCO_{2it} = \alpha_i + \beta_{1i} * LFOSSIL_{it} + \beta_{2i} * LGDP_{it} + \beta_{3i} * LHYDRO_{it} + \beta_{4i} * LNUC_{it} + \beta_{5i} * LREN_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3.1)$$

A equação 3.1 representa a equação geral de longo prazo entre as emissões de CO₂ *per capita*, os combustíveis fósseis, o PIB *per capita*, a energia hidroelétrica, a energia nuclear e as restantes energias renováveis onde, *i* representa o país, *t* representa o período temporal, α_i representa o efeito fixo e ε_{it} representa o erro. β_1 , β_2 , β_3 , β_4 e β_5 representam as elasticidades das emissões de CO₂ *per capita* em relação aos combustíveis fósseis, PIB *per capita*, energia hidroelétrica, energia nuclear e restantes energias renováveis, respetivamente. É esperado que

β_1 e β_2 sejam positivos, pois um aumento na produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis ou um aumento do PIB *per capita* respectivamente, provocam um aumento das emissões. β_3 , β_4 e β_5 espera-se que sejam negativos, pois prevê-se que fontes de energias não dependentes de combustíveis fósseis contribuam para uma maior redução nas emissões.

Para estudar as relações anteriormente descritas, existem testes iniciais que necessitam de ser realizados. Além das estatísticas descritivas, será realizado o teste de normalidade do modelo - *Jarque-bera* proposto por Jarque e Bera (1980) e, de seguida iremos testar a existência ou não de colinearidade entre as variáveis.

Será também testado o nível de estacionaridade das variáveis através de testes de raiz unitária. Estes testes servem para verificar se as variáveis são ou não estacionárias e, em caso afirmativo, qual o nível de estacionaridade. Serão aplicados quatro testes, o teste augmented Dickey-Fuller (ADF) que será dividido em ADF-Fisher (Maddala e Wu, 1999) e ADF-Choi (Choi, 2001), o teste LLC (Levin *et al.*, 2002) e o teste IPS (Im *et al.*, 2003).

Para os testes ADF-Fisher (Maddala e Wu, 1999) e ADF-Choi (Choi, 2001) a hipótese nula tem subjacente a existência de uma raiz unitária individual.

O teste LLC proposto por Levin *et al.* (2002) assume que existe uma raiz unitária comum para a amostra de países e tem, por hipótese nula a não-estacionaridade (contém uma raiz unitária) do modelo $H_0: \beta_i=0$ e como hipótese alternativa a sua estacionaridade (não existe uma raiz unitária), $H_1: \beta_i<0$.

Im *et al.* (2003) propuseram um teste assente na hipótese (nula) da não estacionaridade e assumem que existe uma raiz unitária individual para cada país da amostra. Neste modelo, a hipótese nula é $H_0: \beta_i=0$ contra a hipótese alternativa $H_1: \beta_i<0$.

Após os resultados obtidos nos testes de raízes unitárias, é importante verificar se as variáveis são ou não cointegradas de forma a estudar a relação de longo prazo entre as mesmas. Para isso vão ser aplicados os testes propostos por Pedroni (1999, 2004). Estes testes assentam na hipótese nula (H_0) de não existir cointegração. Os testes de cointegração desenvolvidos por Pedroni (1999, 2004) são aplicados a amostras de dimensão mais reduzida. Propôs assim dois testes de cointegração divididos em *panel tests* e *group tests*. Os *panel tests* (*within-dimension*) estão subdivididos em *v-statistic*, *rho-statistic*, *PP-statistic* e *ADF-statistic*. Os *group-tests* (*between-dimension*) estão subdivididos em *rho-statistic*, *PP-statistic* e *ADF-statistic*. A diferença entre *within-dimension* e *between-dimension* é que estes últimos permitem a existência

de heterogeneidade entre os *cross-section* do painel. A equação 3.2 representa a equação geral deste teste:

$$y_{i,t} = a_i + \delta_i t + \beta_{1i} * x_{1i,t} + \beta_{2i} * x_{2i,t} + \dots + \beta_{Mi} * x_{Mi,t} + \varepsilon_{i,t}, \quad (3.2)$$

Onde $t=1, \dots, T$; $i=1, \dots, N$; $m=1, \dots, M$. Em que T se refere ao número de observações temporais, N ao número de membros individuais da amostra e M ao número das variáveis.

Após verificarmos a existência de cointegração, podemos então aplicar os modelos *Fully Modified Ordinary Least Squares* (FMOLS) descrito por Phillips e Hansen (1990), McCoskey e Kao (1998) e Pedroni (2001) e o *Dynamic Ordinary Least Squares* (DOLS) descrito por Saikkonen (1991), Stock e Watson (1993) e Pedroni (2001). Ambos os modelos são corretamente aplicados em casos onde as variáveis são $I(1)$ e são cointegradas. Estes modelos corrigem os viesamentos obtidos pelo modelo OLS, em especial a endogeneidade e a correlação entre as variáveis (Pedroni, 2001). A sua aplicação permite estudar o comportamento e relação de equilíbrio das variáveis no longo prazo.

Por último será analisada a relação causal entre as variáveis. Para isso será aplicado o *error correction model* (ECM) baseado no teste de causalidade de Engle e Granger (1987) que permite estudar a relação causal entre as variáveis no curto e longo prazo. A partir das seguintes equações conseguimos obter o valor do *error correction term* (ECT) que nos permite concluir acerca do equilíbrio de longo prazo das variáveis e qual o seu nível de ajustamento a esse equilíbrio (Engle e Granger, 1987; Farhani, 2013). Este valor tem de estar compreendido entre $[-1; 0]$ e tem de ser estatisticamente significativo (Marques *et al.*, 2016).

$$\begin{aligned} \Delta LCO2_{i,t} = & \theta_{1,i} + \sum_{k=1}^m \theta_{1,1,i,k} * \Delta LFOSSIL_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{1,2,i,k} * \Delta LGDP_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{1,3,i,k} * \Delta LHYDRO_{i,t-k} \\ & + \sum_{k=1}^m \theta_{1,4,i,k} * \Delta LNUC_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{1,5,i,k} * \Delta LREN_{i,t-k} + \tau_{1,i} * ECT_{i,t-1} + \varepsilon_{1,i,t} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta LFOSSIL_{i,t} = & \theta_{2,i} + \sum_{k=1}^m \theta_{2,1,i,k} * \Delta LCO2_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{2,2,i,k} * \Delta LGDP_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{2,3,i,k} * \Delta LHYDRO_{i,t-k} \\ & + \sum_{k=1}^m \theta_{2,4,i,k} * \Delta LNUC_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{2,5,i,k} * \Delta LREN_{i,t-k} + \tau_{2,i} * ECT_{i,t-1} + \varepsilon_{2,i,t} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
\Delta LGDP_{i,t} = & \theta_{3,i} + \sum_{k=1}^m \theta_{3,1,i,k} * \Delta CO2_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{3,2,i,k} * \Delta LFOSIL_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{3,3,i,k} * \Delta LHYDRO_{i,t-k} \\
& + \sum_{k=1}^m \theta_{3,4,i,k} * \Delta LNUC_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{3,5,i,k} * \Delta LREN_{i,t-k} + \tau_{3,i} * ECT_{i,t-1} + \varepsilon_{3,i,t}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
\Delta LHYDRO_{i,t} = & \theta_{4,i} + \sum_{k=1}^m \theta_{4,1,i,k} * \Delta CO2_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{4,2,i,k} * \Delta LFOSIL_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{4,3,i,k} * \Delta LGDP_{i,t-k} \\
& + \sum_{k=1}^m \theta_{4,4,i,k} * \Delta LNUC_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{4,5,i,k} * \Delta LREN_{i,t-k} + \tau_{4,i} * ECT_{i,t-1} + \varepsilon_{4,i,t}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
\Delta LNUC_{i,t} = & \theta_{5,i} + \sum_{k=1}^m \theta_{5,1,i,k} * \Delta CO2_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{5,2,i,k} * \Delta LFOSIL_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{5,3,i,k} * \Delta LGDP_{i,t-k} \\
& + \sum_{k=1}^m \theta_{5,4,i,k} * \Delta LHYDRO_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{5,5,i,k} * \Delta LREN_{i,t-k} + \tau_{5,i} * ECT_{i,t-1} + \varepsilon_{5,i,t}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
\Delta LREN_{i,t} = & \theta_{6,i} + \sum_{k=1}^m \theta_{6,1,i,k} * \Delta CO2_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{6,2,i,k} * \Delta LFOSIL_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{6,3,i,k} * \Delta LGDP_{i,t-k} \\
& + \sum_{k=1}^m \theta_{6,4,i,k} * \Delta LHYDRO_{i,t-k} + \sum_{k=1}^m \theta_{6,5,i,k} * \Delta LNUC_{i,t-k} + \tau_{6,i} * ECT_{i,t-1} + \varepsilon_{6,i,t}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Em que, Δ representa as variáveis em primeiras diferenças – I (1). Os ECT representam o *error correction term*. θ representa o efeito fixo, k é o *lag lenght*, neste caso determinado por *Hannan-Quinn information criterion* (HQ). O τ corresponde ao ajustamento do coeficiente e o ε representa o erro.

O ECT é valor obtido para a variável dependente de cada equação. Neste caso serão obtidos seis valores para o ECT, correspondentes ao total das variáveis presentes neste estudo.

Ao estudar as relações de causalidade no curto-prazo, aplicamos a causalidade de Granger (Engle e Granger, 1987). Tem subjacente a hipótese nula (H_0), a variável independente não tem causalidade de Granger com a variável dependente no curto prazo; $H_0: \delta_{1,j}=0$. Ao rejeitar a hipótese nula, estamos a aceitar que uma variável causa a outra.

Capítulo 4. Desenvolvimento do modelo

Neste capítulo serão apresentados os resultados bem como os processos de estimação que permitiram a obtenção dos mesmos.

Recorde-se que o modelo é composto por seis variáveis (ver tabela 1). Todas as variáveis têm de ser tratadas como logaritmos naturais de forma a reduzir a endogeneidade e possibilitar a estabilidade do modelo.

Na tabela 2 estão descritas as estatísticas do modelo, bem como o teste da normalidade do modelo - *Jarque-Bera* - proposto por Jarque e Bera (1980) onde se verifica a não rejeição da hipótese nula. Pode concluir-se que o modelo segue uma distribuição normal.

Tabela 2- Estatísticas descritivas

| Variáveis | Obs | Cross-sections | Mean | S.D | Min | Max |
|-----------------------------|-----|----------------|-----------|----------|-----------|----------|
| <i>LCO2</i> | 240 | 10 | 13.897659 | 0.761507 | -0.299540 | 3.004630 |
| <i>LFOSSIL</i> | 240 | 10 | 3.690365 | 1.048507 | 0.105855 | 4.539904 |
| <i>LGDP</i> | 240 | 10 | 9.691204 | 1.499362 | 5.697824 | 11.00681 |
| <i>LHYDRO</i> | 240 | 10 | 1.634709 | 1.767922 | -2.995408 | 3.991013 |
| <i>LNUC</i> | 240 | 10 | 2.504364 | 2.483191 | -16.11810 | 4.375905 |
| <i>LRN</i> | 240 | 10 | 0.576323 | 1.443502 | -4.503691 | 3.276582 |
| <i>DLCO2</i> | 240 | 10 | 0.002320 | 0.048099 | -0.141999 | 0.180458 |
| <i>DLFOSSIL</i> | 240 | 10 | -0.010947 | 0.128944 | -0.649331 | 0.552881 |
| <i>DLGDP</i> | 240 | 10 | 0.044821 | 0.088594 | -0.294840 | 0.252980 |
| <i>DLHYDRO</i> | 240 | 10 | -0.007793 | 0.195781 | -0.684671 | 0.699595 |
| <i>DLNUC</i> | 240 | 10 | -0.015182 | 1.441889 | -15.98871 | 14.46427 |
| <i>DLRN</i> | 240 | 10 | 0.147483 | 0.206821 | -0.701156 | 1.727406 |
| Teste aos resíduos: | | | | | | |
| <i>Jarque-Bera</i> 2.805904 | | | | | | |
| <i>Skenmess</i> 0.233412 | | | | | | |
| <i>Kurtosis</i> 2.749668 | | | | | | |

A colinearidade é uma questão importante entre as variáveis. A matriz da correlação representada na tabela 3 para variáveis em logaritmos e na tabela 4 para variáveis em primeiras diferenças demonstra que neste caso a colinearidade não é um problema pois não existe nenhum valor superior a 85%. Ao verificarmos o valor do VIF (*Variance Inflation Factor*)

para ambos os modelos, comprovamos que não existe multicolinearidade entre as variáveis pois todos os valores são inferiores a 10 (tabela 5).

Tabela 3- Matriz das correlações (variáveis em logaritmos)

| | LCO_2 | $LFOSSIL$ | $LGDP$ | $LHYDRO$ | $LNUC$ | $LREN$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| LCO_2 | 1.000000 | | | | | |
| $LFOSSIL$ | 0.042357 | 1.000000 | | | | |
| $LGDP$ | 0.844124 | -0.336956 | 1.000000 | | | |
| $LHYDRO$ | -0.437337 | -0.411744 | -0.317604 | 1.000000 | | |
| $LNUC$ | 0.322211 | -0.391253 | 0.513550 | -0.017884 | 1.000000 | |
| $LREN$ | 0.408199 | -0.139136 | 0.639449 | -0.207197 | 0.304472 | 1.000000 |

Tabela 4- Matriz das correlações (variáveis em primeiras diferenças)

| | $DLCO_2$ | $DLFOSSIL$ | $DLGDP$ | $DLHYDRO$ | $DLNUC$ | $DLREN$ |
|------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| $DLCO_2$ | 1.000000 | | | | | |
| $DLFOSSIL$ | 0.394409 | 1.000000 | | | | |
| $DLGDP$ | 0.339443 | 0.083934 | 1.000000 | | | |
| $DLHYDRO$ | -0.196715 | -0.261000 | -0.106160 | 1.000000 | | |
| $DLNUC$ | 0.080243 | -0.008500 | 0.072020 | -0.018303 | 1.000000 | |
| $DLREN$ | 0.109858 | -0.012339 | 0.219690 | -0.027610 | -0.030019 | 1.000000 |

Tabela 5- Teste VIF

| | <i>VIF DOLS</i> | <i>VIF FMOLS</i> |
|-----------------------------|-----------------|------------------|
| $LFOSSIL$ | 1.149790 | 1.137262 |
| $LGDP$ | 2.670745 | 3.492325 |
| $LHYDRO$ | 1.340635 | 1.337426 |
| $LNUC$ | 1.034360 | 1.067492 |
| $LREN$ | 2.808870 | 3.632116 |

Os testes de raiz unitária permitem estudar a estacionaridade das variáveis presentes no modelo. Dois dos testes realizados foram o ADF-Fisher (Maddala e Wu, 1999) e o ADF-Choi (Choi, 2001). O primeiro teste é considerado um teste com resultados mais consistentes e, assim como o segundo tem subjacente a hipótese nula de uma raiz unitária comum. Após a realização de ambos, verificamos a não existência de uma raiz unitária e a estacionaridade em primeiras diferenças de todas as variáveis.

Outro teste foi proposto por Levin *et al.* (2002) sob a hipótese nula de existir uma raiz unitária individual. Após a realização desse teste, verificamos que ao rejeitar a hipótese nula demonstramos que todas as variáveis são estacionárias em primeiras diferenças.

Por último temos o teste IPS proposto por Im *et al.* (2003) que propões a não estacionaridade do modelo e a existência de uma raiz unitária individual. Após estimação deste modelo, concluímos que todas as variáveis são estacionárias em primeiras diferenças. Em suma verificamos que todas as variáveis presentes no modelo são do tipo I (1) como se pode verificar pela análise da tabela 6.

As variáveis ao serem significativas a 1%, 5% ou 10% permitem a rejeição da hipótese nula, o que nos permite concluir que são estacionárias em primeiras diferenças.

Tabela 6- Teste de raiz unitária

| Variáveis | LLC | | | ADF-Fisher | | | ADF-Choi | | | IPS | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | a) | b) | c) | a) | b) | c) | a) | b) | c) | a) | b) |
| <i>LCO₂</i> | 1.19170 | -0.54600 | -2.88503*** | 7.93172 | 15.1854 | 30.0415* | 3.82758 | 1.47977 | -1.30248* | 3.82555 | 1.43300 |
| <i>LFOSSIL</i> | 2.90274 | 0.73021 | -2.75331*** | 8.30290 | 13.1186 | 30.6104* | 2.83920 | 1.82007 | -1.47872* | 2.73951 | 1.79527 |
| <i>LGDP</i> | -0.47453 | -0.72675 | 3.95165 | 10.0719 | 23.1877 | 1.61271 | 2.46439 | -0.95264 | 5.41368 | 2.30790 | -0.86022 |
| <i>LHYDRO</i> | -1.46691* | -0.07267 | -1.45011* | 38.3842*** | 29.5450* | 15.8798 | -2.91906*** | -1.99697** | -0.06977 | -2.77927*** | -1.79755** |
| <i>LNUC</i> | -34.0504*** | -60.8498*** | -1.11684 | 291.862*** | 288.193*** | 45.5923*** | -3.62382*** | -3.39616*** | -2.36298*** | -16.6326*** | -26.0373*** |
| <i>LREN</i> | -0.93990 | 0.33943 | 2.44405 | 11.7800 | 6.67754 | 14.6437 | 3.65138 | 3.70822 | 2.91610 | 3.86841 | 3.57262 |
| <i>DLCO₂</i> | -4.16096*** | -4.13234*** | -6.37603*** | 72.6848*** | 69.7319*** | 100.276*** | -5.84614*** | -5.56149*** | -7.51342*** | -5.89059*** | -5.83495*** |
| <i>DLFOSSIL</i> | -5.01719*** | -4.21861*** | -10.8158*** | 93.9336*** | 83.4791*** | 127.792*** | -7.30918*** | -6.58259*** | -9.25138*** | -7.66890*** | -7.14354*** |
| <i>DLGDP</i> | -8.78257*** | -6.79436*** | -6.22159*** | 90.7959*** | 60.7229*** | 99.4024*** | -7.08806*** | -5.08097*** | -7.16912*** | -7.37381*** | -5.11441*** |
| <i>DLHYDRO</i> | -7.34603*** | -5.27948*** | -13.2023*** | 111.402*** | 82.2877*** | 169.674*** | -8.27884*** | -6.53383*** | -11.0420*** | -9.01442*** | -7.06011*** |
| <i>DLNUC</i> | -76.3148*** | -60.2464*** | -68.3097*** | 354.261*** | 334.831*** | 146.312*** | -9.72109*** | -8.74403*** | -7.88102*** | -30.5360*** | -25.7215*** |
| <i>DLREN</i> | -3.56737*** | -5.25003*** | -3.55422*** | 53.9380*** | 63.8434*** | 39.0053*** | -4.10350*** | -4.93965*** | -3.07702*** | -4.08649*** | -5.18751*** |

Nota: ***, ** e * representam um nível de significância a 1%, 5% e 10%, respectivamente

Pedroni (1999, 2004) realizou testes de cointegração de modo a estudar os efeitos de longo prazo entre as variáveis.

Tabela 7- Teste de cointegração

| | Statistic | Prob. | | Statistic | Prob. |
|-------------------------|--------------|--------|----------------------------|--------------|--------|
| Within-dimension | | | Between - dimension | | |
| Panel v-statistic | -1.390993 | 0.9179 | | | |
| Panel rho-statistic | 1.193412 | 0.8836 | Group rho-statistic | 2.374217 | 0.9912 |
| Panel PP-statistic | -4.587516*** | 0.0000 | Group PP-statistic | -5.910280*** | 0.0000 |
| Panel ADF-statistic | -3.781737*** | 0.0001 | Group ADF-statistic | -3.894324*** | 0.0000 |

Nota: ***, ** e * representam um nível de significância a 1%, 5% e 10%, respetivamente

Os testes desenvolvidos por Pedroni (1999, 2004) apenas são corretamente aplicados em painéis heterogêneos e para variáveis do tipo I (1), sendo o caso das variáveis em estudo como podemos comprovar pelos testes de raiz unitária desenvolvidos anteriormente (tabela 6).

De acordo com Pedroni (1999, 2004), é entendida como hipótese nula (H0) nestes testes a não cointegração entre as variáveis. Podemos verificar, pela análise da tabela 7 que quatro dos sete testes desenvolvidos rejeitam a hipótese nula pois são significativos a 1%. Tais resultados sugerem a existência de cointegração entre as variáveis e a existência de uma relação a longo prazo entre as mesmas para o total da amostra (Pedroni 1999, 2004).

A tabela 8 representa os resultados para um painel composto por 10 países. Os métodos FMOLS e DOLS foram testados para o total da amostra. Os coeficientes obtidos podem ser considerados como sendo elasticidades de longo prazo (Farhani, 2013).

Tabela 8- Testes FMOLS e DOLS

| | FMOLS | DOLS |
|----------------|--------------|--------------|
| <i>LFOSSIL</i> | 0.430949*** | 0.348130*** |
| <i>LGDP</i> | 0.490696*** | 0.436018*** |
| <i>LHYDRO</i> | 0.148634** | 0.095066 |
| <i>LNUC</i> | 0.006989 | 0.005196 |
| <i>LREN</i> | -0.091014*** | -0.063952*** |

Nota: ***, ** e * representam um nível de significância a 1%, 5% e 10%, respetivamente

O método *Fully Modified Ordinary Least Squares* (FMOLS) foi descrito por Phillips e Hansen (1990), McCoskey e Kao (1998) e Pedroni (2001) e o método *Dynamic Ordinary Least Squares* (DOLS) foi descrito por Saikkonen (1991), Stock e Watson (1993) e Pedroni (2001). Ambos os modelos permitem estudar uma relação de equilíbrio a longo prazo.

Como podemos observar na tabela 8, para o modelo FMOLS, os combustíveis fósseis e o PIB *per capita* têm uma influência significativa e positiva sobre as emissões de CO₂, ou seja, o aumento de 1% na produção de eletricidade através de combustíveis fósseis leva a um aumento de cerca de 43,1% nas emissões de CO₂ *per capita*. Já um aumento de 1% do PIB *per capita* leva a um aumento de cerca de 49,1% nas emissões de CO₂ *per capita*.

Em oposição, temos as energias renováveis (com exceção da hidroelétrica) onde um aumento de 1% da sua produção, leva a uma diminuição de cerca de 9,1% das emissões de CO₂ *per capita*. No caso da energia hidroelétrica, esta é significativa embora o resultado não seja o pretendido, pois aparece como contribuindo para aumentar as emissões. Já a energia nuclear não é significativa para explicar as emissões de CO₂.

Quanto ao modelo DOLS (ver tabela 8) verificamos que os resultados obtidos para os combustíveis fósseis e para o PIB *per capita* também são significativos. Um aumento de 1% nos combustíveis fósseis provoca um aumento de cerca de 34,8% das emissões de CO₂ e para um aumento de 1% no PIB, as emissões aumentam aproximadamente 43,6%. No caso do modelo DOLS a energia hidroelétrica não é significativa assim como a energia nuclear. No caso das restantes energias renováveis, podemos verificar que ao aumentar em 1% a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis podemos reduzir em cerca de 6,4% as emissões de CO₂.

Por último foi estudada a causalidade entre as variáveis no curto prazo e no longo prazo. O *error correction model* (ECM) foi proposto por Engle e Granger (1987) e permite verificar a relação causal no longo prazo entre as variáveis. Antes de aplicar o modelo, é necessário estimar o número correto de *lags* a serem aplicados, através do *lag length criteria*. Obtivemos um número correto de *lags* de 3 de acordo com o *Hannan-Quinn information criterion* (HQ). Conseguimos então determinar o *error correction term* (ECT) para cada variável, ou seja, conseguimos verificar o nível de ajustamento de cada variável ao longo do tempo (Farhani, 2013). O valor do ECT está inserido no intervalo [-1,0] (Marques *et al.*, 2016) e tem de ser estatisticamente significativo (ver tabela 9).

Tabela 9- Causalidade de Granger

| <i>Variáveis dependentes</i> | <i>Variáveis independentes</i> | | | | | | |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------------|
| | <i>Curto-prazo</i> | | | | | | <i>Longo-prazo</i> |
| | <i>DLCO2</i> | <i>DLFOSSIL</i> | <i>DLGDP</i> | <i>DLHYDRO</i> | <i>DLNUC</i> | <i>DLREN</i> | <i>ECT</i> |
| <i>DLCO2</i> | - | 7.529128* | 1.167757 | 6.775324* | 3.025819 | 6.879207* | -0.010448*** |
| <i>DLFOSSIL</i> | 4.656821 | - | 3.403278 | 2.602138 | 1.157305 | 0.447581 | -0.005806** |
| <i>DLGDP</i> | 18.83184*** | 3.212173 | - | 3.276459 | 3.045703 | 0.70224 | 0.022164** |
| <i>DLHYDRO</i> | 8.806744** | 0.641114 | 1.081596 | - | 0.808449 | 2.253006 | -0.014916** |
| <i>DLNUC</i> | 1.637168 | 3.224735 | 8.145390** | 0.528983 | - | 5.953073 | 0.781944 |
| <i>DLREN</i> | 4.413738 | 3.927915 | 2.442524 | 2.564924 | 152.1367*** | - | -0.013751** |

Nota: ***, ** e * representam um nível de significância a 1%, 5% e 10%, respectivamente

Podemos verificar que cumpre estes requisitos para a emissão *per capita* de CO₂, para a percentagem de produção de combustíveis fósseis, PIB *per capita*, percentagem de produção de energia hidroelétrica e por fim para a percentagem de produção de energias renováveis com exceção da hidroelétrica. Os resultados obtidos para as variáveis mencionadas demonstram que estas respondem a eventuais choques, conseguindo compensar o seu desvio do ponto de equilíbrio ao longo do tempo (Farhani, 2013; Lu, 2017).

Em relação ao curto prazo, verificamos que apenas os combustíveis fósseis, a energia hidroelétrica e as restantes energias renováveis têm uma relação de causalidade com as emissões de CO₂. Sendo que no caso da energia hidroelétrica existe uma relação de causalidade bidirecional. O PIB não apresenta relação de causalidade com as emissões de CO₂ no curto prazo. Estes resultados permitem concluir que embora os combustíveis fósseis contribuam para um aumento das emissões, a energia hidroelétrica e as restantes energias renováveis contribuem para a sua diminuição. Estas observações vão ao encontro dos resultados obtidos por Farhani (2013) que conclui que as energias renováveis têm uma relação de causalidade de Granger com as emissões de CO₂ ao contrário do PIB. Os combustíveis fósseis causam as emissões, no entanto estes resultados são opostos aos obtidos por Lotfalipour *et al.* (2010) que não obtiveram relação causal entre estas duas variáveis.

Capítulo 5. Conclusão

Com esta investigação foi possível analisar a relação de equilíbrio a longo prazo e a relação causal no curto e no longo prazo entre as emissões *per capita* de CO₂, o PIB *per capita*, e a produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis, de energia nuclear e de energias renováveis. É comum utilizar o consumo como variável explicativa das emissões, no entanto para este estudo foram utilizadas a produção de energia pelas determinadas fontes de produção de eletricidade (% total) assim como variáveis *per capita* (emissões de CO₂ e o PIB). A presente investigação foi realizada para uma amostra de 10 países entre 1991 e 2014.

Após um breve enquadramento do tema e da metodologia a ser utilizada, procedeu-se ao desenvolvimento do modelo. Em primeiro lugar realizaram-se testes básicos de especificação, como testes à colinearidade entre as variáveis de modo a rejeitar esta hipótese. Em seguida, procedeu-se ao teste de estacionaridade do modelo a partir de vários testes de raiz unitária onde se concluiu que as variáveis são estacionárias em primeiras diferenças, são I (1). Também foi possível verificar a existência de cointegração entre as variáveis a partir dos testes propostos por Pedroni (2004) permitindo concluir que existe uma relação de longo prazo entre as emissões de CO₂, os combustíveis fósseis, o PIB e as energias renováveis.

Os resultados destes testes iniciais foram importantes para aplicar os modelos FMOLS e DOLS e investigar as relações de equilíbrio no longo prazo entre as variáveis. Como era expectável, os resultados obtidos para os combustíveis fósseis mostram que estes contribuem para um aumento nas emissões de CO₂. Em ambos os modelos, os resultados foram semelhantes. Para o modelo FMOLS, quando existe um aumento de 1% na produção de eletricidade a partir de fontes fósseis as emissões carbónicas aumentam em cerca de 43,1%. Já para o modelo DOLS, um aumento desta variável explicativa provoca um aumento de cerca de 34,8% nas emissões. Os nossos resultados são semelhantes aos obtidos por Tiwari *et al.* (2013), que ao utilizarem apenas o carvão concluem que o consumo deste combustível fóssil provoca um aumento nas emissões de CO₂.

Quanto à variável PIB *per capita* podemos verificar que esta contribui para o aumento das emissões. Estes resultados vão ao encontro dos existentes em alguma literatura, nomeadamente Bilgili *et al.* (2016). Para o modelo FMOLS, um aumento de 1% no PIB *per capita* provoca um aumento de cerca de 49,1% nas emissões de CO₂. Enquanto que no

modelo DOLS o aumento de 1% no PIB contribui para um aumento de aproximadamente 43,6% nas emissões.

A produção de eletricidade a partir da energia hidroelétrica obteve resultados diferentes em ambos os modelos. No modelo FMOLS a variável é significativa no modelo, mas contribui para um aumento das emissões, ou seja, um aumento de 1% na produção de eletricidade, aumenta em cerca de 14,9% as emissões. Quanto ao modelo DOLS, esta variável não é significativa para o estudo. A energia hidroelétrica é uma energia relativamente recente e pode ainda não existir produção suficiente que impacte o CO₂. As energias renováveis aparecem como sendo fontes de diminuição das emissões para ambos os modelos. No modelo FMOLS podemos concluir que um aumento de 1% nestas energias provoca uma redução das emissões em cerca de 9,1% e no modelo DOLS provoca uma diminuição de cerca de 6,4%. Estes resultados demonstram que existe uma relação de longo prazo entre as energias renováveis e as emissões de CO₂. Estas conclusões apontam no mesmo sentido das obtidas por Ito (2017) que comprovou que as energias renováveis contribuem para uma redução das emissões.

Os resultados obtidos para a energia nuclear não foram os esperados. Dado que o total da amostra é composta por países dependentes de energia nuclear, era expectável que os resultados obtidos para esta variável apontassem no sentido da diminuição das emissões de CO₂ aquando da sua utilização. No entanto, para ambos os modelos os resultados obtidos não são significativos. Podemos concluir que a energia nuclear não tem - a longo prazo - impacto na redução das emissões. Estas conclusões são opostas às ideias obtidas por alguns autores, nomeadamente Apergis *et al.* (2010) e Menyah e Wolde-Rufael (2010) que salientam a importância da energia nuclear na mitigação das emissões.

Podemos dar resposta à primeira questão de investigação, afirmando que a longo prazo a produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis vai provocar um aumento nas emissões, assim como o PIB *per capita*. Em relação às energias renováveis, estas de facto contribuem para a mitigação das emissões a longo prazo, sugerindo assim a necessidade de os governos continuarem a apostar nas mesmas. Em relação à energia nuclear, esta não tem impacto a longo prazo na redução das emissões.

Outro objetivo deste estudo era verificar a existência ou não de uma relação de causalidade entre as variáveis. Para isso foi aplicado um teste de causalidade proposto por

Engle e Granger (1987). Ao aplicar o ECM (*Error Correction Model*) foi possível verificarmos que as emissões de CO₂, os combustíveis fósseis, a energia hidroelétrica e as restantes energias renováveis ajustam-se no longo prazo a eventuais choques.

No curto prazo verificamos que existe uma relação causal unidirecional entre os combustíveis fósseis e as emissões de CO₂. Estes resultados não vão de encontro aos obtidos por Lotfalipour *et al.* (2010) que não verificou uma relação causal entre estas duas variáveis.

Também é possível observar uma relação de causalidade entre as energias renováveis (com exceção da energia hidroelétrica) e as emissões de CO₂. Farhani (2013) obtém semelhantes resultados no curto prazo quando considera as emissões de CO₂ como variável dependente.

Podemos deduzir que existe a necessidade de aumentar as medidas de política energética de forma a reduzir a produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis e, por outro lado, verificamos que a adoção dessas políticas de aumento da produção de eletricidade a partir de fontes renováveis têm de facto um impacto na redução das emissões. O mesmo é comprovado pela relação de causalidade bidirecional entre a energia hidroelétrica e as emissões de CO₂.

Era expectável que fosse obtido um resultado de causalidade entre o PIB *per capita* e as emissões de CO₂, como obtido por Menyah e Wolde-Rufael (2010). No entanto não encontrámos relação de causalidade no curto prazo entre estas duas variáveis, semelhante a Farhani (2003) quando considerou o CO₂ como variável dependente.

A partir desta análise é possível dar resposta à segunda pergunta de investigação colocada inicialmente, em que podemos afirmar que de facto existe uma relação de causalidade entre os combustíveis fósseis, a energia hidroelétrica e as restantes energias renováveis face às emissões de CO₂ num curto prazo. A mesma relação não foi obtida para o PIB *per capita* e a energia nuclear.

Em resposta à última questão de investigação, é possível concluir que a estratégia de mitigação que se revelou mais eficaz na redução das emissões é a produção de eletricidade a partir de energias renováveis. Os resultados obtidos para a energia nuclear demonstram que esta energia não tem qualquer impacto na redução das emissões, quer no curto prazo quer no longo prazo. No caso das energias renováveis, estas têm uma relação de causalidade com as emissões de CO₂ no curto prazo e irão provocar a sua diminuição a longo prazo.

5.1. Trabalhos futuros

Para concluir e como orientação futura, seria interessante realizar este estudo com uma amostra alargada para cerca de 50 anos. Ao longo do tempo, as tecnologias fósseis sofreram alterações e tornaram-se mais sofisticadas e com menores emissões por kWh emitido. Ao ter acesso a novos dados que nos permitissem separar a produção de energia elétrica térmica entre o carvão, o gás natural e o *fuel* seria possível estudar o seu impacto individual e quantificar esse impacto nas emissões.

Referências

- Akella, A., Saini, R., e Sharma, M. P. (2009), "Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems", *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 2, pp. 390-396.
- Ang, B. W., e Su, B. (2016), "Carbon emission intensity in electricity production: A global analysis", *Energy Policy*, Vol. 94, pp. 56-63.
- Ang, J. B. (2007), "CO₂ emissions, energy consumption, and output in France", *Energy Policy*, Vol. 35, No. 10, pp. 4772-4778.
- Apergis, N., Payne, J. E., Menyah, K., e Wolde-Rufael, Y. (2010), "On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth", *Ecological Economics*, Vol. 69, No. 11, pp. 2255-2260.
- Ayoub, N., e Yuji, N. (2012), "Governmental intervention approaches to promote renewable energies—Special emphasis on Japanese feed-in tariff", *Energy Policy*, Vol. 43, pp. 191-201.
- Baek, J. (2015), "A panel cointegration analysis of CO₂ emissions, nuclear energy and income in major nuclear generating countries", *Applied Energy*, Vol. 145, pp. 133-138.
- Bean, P., Blazquez, J., e Nezamuddin, N. (2017), "Assessing the cost of renewable energy policy options – A Spanish wind case study", *Renewable Energy*, Vol. 103, pp. 180-186.
- Bilgili, F., Koçak, E., e Bulut, Ü. (2016), "The dynamic impact of renewable energy consumption on CO₂ emissions: A revisited Environmental Kuznets Curve approach", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 838-845.
- BP (2018), *BP energy outlook*. Retirado de <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>. Acedido em 05.03.2018.
- Chen, Q., Kang, C., Xia, Q., e Guan, D. (2011), "Preliminary exploration on low-carbon technology roadmap of China's power sector", *Energy*, Vol. 36, No. 3, pp. 1500-1512.
- Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Suzuki, M., e Antal, M. (2017), "Comparing electricity transitions: A historical analysis of nuclear, wind and solar power in Germany and Japan", *Energy Policy*, Vol. 101, pp. 612-628.
- Choi, I. (2001), "Unit root tests for panel data", *Journal of International Money and Finance*, Vol. 20, No. 2, pp. 249-272.

- Dong, F., Yu, B., Hadachin, T., Dai, Y., Wang, Y., Zhang, S., e Long, R. (2018), "Drivers of carbon emission intensity change in China", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 129, pp. 187-201.
- Egging, R., e Tomasgard, A. (2018), "Norway's role in the European energy transition", *Energy Strategy Reviews*, Vol. 20, pp. 99-101.
- Engle, R. F., e Granger, C. W. (1987), "Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing", *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, Vol. 55, No. 2, pp. 251-276.
- Farhani, S. (2013), "Renewable energy consumption, economic growth and CO2 emissions: Evidence from selected MENA countries", *Energy Economics Letters*, Vol. 1, No. 2, pp. 24-41.
- Gismondi, M. (2018), "Historicizing transitions: The value of historical theory to energy transition research", *Energy Research & Social Science*, Vol. 38, pp. 193-198.
- Gu, B., Tan, X., Zeng, Y., e Mu, Z. (2015), "CO2 Emission Reduction Potential in China's Electricity Sector: Scenario Analysis Based on LMDI Decomposition", *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 2436-2447.
- Guidolin, M., e Guseo, R. (2016), "The German energy transition: Modeling competition and substitution between nuclear power and Renewable Energy Technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 1498-1504.
- Huenteler, J., Schmidt, T. S., e Kanie, N. (2012), "Japan's post-Fukushima challenge – implications from the German experience on renewable energy policy", *Energy Policy*, Vol. 45, pp. 6-11.
- Im, K. S., Pesaran, M. H., e Shin, Y. (2003), "Testing for unit roots in heterogeneous panels", *Journal of Econometrics*, Vol. 115, No. 1, pp. 53-74.
- Ito, K. (2017), "CO2 emissions, renewable and non-renewable energy consumption, and economic growth: Evidence from panel data for developing countries", *International Economics*, Vol. 151, pp. 1-6.
- Jaforullah, M., e King, A. (2015), "Does the use of renewable energy sources mitigate CO2 emissions? A reassessment of the US evidence", *Energy Economics*, Vol. 49, pp. 711-717.
- Jägemann, C., Fürsch, M., Hagspiel, S., e Nagl, S. (2013), "Decarbonizing Europe's power sector by 2050 — Analyzing the economic implications of alternative decarbonization pathways", *Energy Economics*, Vol. 40, pp. 622-636.

- Jarque, C. M., e Bera, A. K. (1980), "Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals", *Economics Letters*, Vol. 6, No. 3, pp. 255-259.
- Klass, D. L. (2003), "A critical assessment of renewable energy usage in the USA", *Energy Policy*, Vol. 31, No. 4, pp. 353-367.
- Klein, D. E. (2016), "CO 2 emission trends for the US and electric power sector", *The Electricity Journal*, Vol. 29, No. 8, pp. 33-47.
- Klessmann, C., Held, A., Rathmann, M., e Ragwitz, M. (2011), "Status and perspectives of renewable energy policy and deployment in the European Union—What is needed to reach the 2020 targets?", *Energy Policy*, Vol. 39, No. 12, pp. 7637-7657.
- Kumar, A., Kumar, K., Kaushik, N., Sharma, S., e Mishra, S. (2010), "Renewable energy in India: current status and future potentials", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 8, pp. 2434-2442.
- Levin, A., Lin, C.-F., e James Chu, C.-S. (2002), "Unit root tests in panel data: asymptotic and finite-sample properties", *Journal of Econometrics*, Vol. 108, No. 1, pp. 1-24.
- Lotfalipour, M. R., Falahi, M. A., e Ashena, M. (2010), "Economic growth, CO2 emissions, and fossil fuels consumption in Iran", *Energy*, Vol. 35, No. 12, pp. 5115-5120.
- Lu, W.-C. (2017), "Greenhouse gas emissions, energy consumption and economic growth: a panel cointegration analysis for 16 Asian countries", *International journal of environmental research and public health*, Vol. 14, No. 11, pp. 1436.
- Maddala, G. S., e Wu, S. (1999), "A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test", *Oxford Bulletin of Economics and statistics*, Vol. 61, No. S1, pp. 631-652.
- Marques, A. C., e Fuinhas, J. A. (2011), "Drivers promoting renewable energy: A dynamic panel approach", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1601-1608.
- Marques, A. C., Fuinhas, J. A., e Menegaki, A. N. (2016), "Renewable vs non-renewable electricity and the industrial production nexus: Evidence from an ARDL bounds test approach for Greece", *Renewable Energy*, Vol. 96, pp. 645-655.
- Mathiesen, B. V., Lund, H., e Karlsson, K. (2011), "100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth", *Applied Energy*, Vol. 88, No. 2, pp. 488-501.
- Mbarek, M. B., Khairallah, R., e Feki, R. (2015), "Causality relationships between renewable energy, nuclear energy and economic growth in France", *Environment Systems and Decisions*, Vol. 35, No. 1, pp. 133-142.

- McCoskey, S., e Kao, C. (1998), "A residual-based test of the null of cointegration in panel data", *Econometric reviews*, Vol. 17, No. 1, pp. 57-84.
- Menyah, K., e Wolde-Rufael, Y. (2010), "CO2 emissions, nuclear energy, renewable energy and economic growth in the US", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 6, pp. 2911-2915.
- Moutinho, V., e Robaina, M. (2016), "Is the share of renewable energy sources determining the CO2 kWh and income relation in electricity generation?", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 65, pp. 902-914.
- Musa, S. D., Zhonghua, T., Ibrahim, A. O., e Habib, M. (2018), "China's energy status: A critical look at fossils and renewable options", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 2281-2290.
- Nordensvärd, J., e Urban, F. (2015), "The stuttering energy transition in Germany: Wind energy policy and feed-in tariff lock-in", *Energy Policy*, Vol. 82, pp. 156-165.
- Ortega, M., del Río, P., e Montero, E. A. (2013), "Assessing the benefits and costs of renewable electricity. The Spanish case", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, pp. 294-304.
- Ozcan, B. (2013), "The nexus between carbon emissions, energy consumption and economic growth in Middle East countries: A panel data analysis", *Energy Policy*, Vol. 62, pp. 1138-1147.
- Pedroni, P. (1999), "Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors", *Oxford Bulletin of Economics and statistics*, Vol. 61, No. S1, pp. 653-670.
- Pedroni, P. (2001), "Purchasing power parity tests in cointegrated panels", *The review of Economics and Statistics*, Vol. 83, No. 4, pp. 727-731.
- Pedroni, P. (2004), "Panel cointegration: asymptotic and finite sample properties of pooled time series tests with an application to the PPP hypothesis", *Econometric theory*, Vol. 20, No. 3, pp. 597-625.
- Phillips, P. C., e Hansen, B. E. (1990), "Statistical inference in instrumental variables regression with I (1) processes", *The Review of Economic Studies*, Vol. 57, No. 1, pp. 99-125.
- Saboori, B., Sulaiman, J., e Mohd, S. (2012), "Economic growth and CO2 emissions in Malaysia: A cointegration analysis of the Environmental Kuznets Curve", *Energy Policy*, Vol. 51, pp. 184-191.

- Sadorsky, P. (2009), "Renewable energy consumption, CO2 emissions and oil prices in the G7 countries", *Energy Economics*, Vol. 31, No. 3, pp. 456-462.
- Sagar, A. D., e Van der Zwaan, B. (2006), "Technological innovation in the energy sector: R&D, deployment, and learning-by-doing", *Energy Policy*, Vol. 34, No. 17, pp. 2601-2608.
- Saidi, K., e Mbarek, M. B. (2016), "Nuclear energy, renewable energy, CO2 emissions, and economic growth for nine developed countries: Evidence from panel Granger causality tests", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 88, pp. 364-374.
- Saikkonen, P. (1991), "Asymptotically efficient estimation of cointegration regressions", *Econometric theory*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-21.
- Scarlat, N., Dallemand, J.-F., Monforti-Ferrario, F., Banja, M., e Motola, V. (2015), "Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 969-985.
- Solomon, B. D., e Krishna, K. (2011), "The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook", *Energy Policy*, Vol. 39, No. 11, pp. 7422-7431.
- Stock, J. H., e Watson, M. W. (1993), "A simple estimator of cointegrating vectors in higher order integrated systems", *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, Vol. 61, No. 4, pp. 783-820.
- Syri, S., Kurki-Suonio, T., Satka, V., e Cross, S. (2013), "Nuclear power at the crossroads of liberalised electricity markets and CO2 mitigation – Case Finland", *Energy Strategy Reviews*, Vol. 1, No. 4, pp. 247-254.
- Tiwari, A. K., Shahbaz, M., e Adnan Hye, Q. M. (2013), "The environmental Kuznets curve and the role of coal consumption in India: Cointegration and causality analysis in an open economy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18, pp. 519-527.
- Tönurist, P., den Besten, D., Vandeven, P., Yu, X., e Paplaityte, D. (2015), "Market Liberalization and Innovation in the Energy Sector: The Case of Belgium and the Netherlands", *Administrative Culture*, Vol. 16, No. 2, pp. 83-116.
- Tsai, B.-H., Chang, C.-J., e Chang, C.-H. (2016), "Elucidating the consumption and CO2 emissions of fossil fuels and low-carbon energy in the United States using Lotka–Volterra models", *Energy*, Vol. 100, pp. 416-424.
- van Rooijen, S. N. M., e van Wees, M. T. (2006), "Green electricity policies in the Netherlands: an analysis of policy decisions", *Energy Policy*, Vol. 34, No. 1, pp. 60-71.

- Wang, Y. (2006), "Renewable electricity in Sweden: an analysis of policy and regulations", *Energy Policy*, Vol. 34, No. 10, pp. 1209-1220.
- World Bank (2018), *World Development Indicators*. Disponível em <https://data.worldbank.org/indicator>. Acedido em 28.06.2018.
- Zongxin, W., e Zhihong, W. (1997), "Mitigation assessment results and priorities for China's energy sector", *Applied Energy*, Vol. 56, No. 3, pp. 237-251.